

Deutsches Genus als neuronales Netzwerk

Thomas Michael Gross

要 旨

ドイツ語を習っている人々にとって、ドイツ語の性はかなり大きな壁となっている。ドイツ人が簡単に性を決めるのはいったいなぜであろう？ 聞いたこともない名詞の性を考えずに決めることができるので、暗記しているわけではない。

本文では、ドイツ語の性をニューラル・ネットとして紹介する。ニューラル・ネットとは、脳神経細胞のモデルで、視覚的知覚研究に多く使われている概念である。その概念の基礎を紹介してから、ドイツ語の性を具体的にニューラル・ネットとして述べる。

0. Das Problem

Alle gegenwärtigen Grammatiktheorien gehen zumindest in ihren Syntaxmodulen von einer hierarchischen Organisierung des Satzes aus. Es bestehen aber Zweifel, ob die Annahme einer hierarchischen Organisierung sich wirklich darauf gründet, was im Gehirn während eines Sprachaktes geschieht. Tesnière (1959: 33, Kap. 5, Satz 11), der Begründer der modernen Dependenzgrammatik, hat darauf hingewiesen, dass Sprache *uni-direktional* und *eindimensional* ist. Eindimensionalität erfordert, dass das einzige Ordnungskriterium für sprachliche Äußerungen eine exklusive *früher-später*-Relation ist. Das bedeutet, dass ein konstitutives Element einer sprachlichen Äußerung entweder *vor* oder aber *nach* einem anderen konstitutiven Element auftreten darf, nicht aber gleichzeitig. Das Kriterium der Uni-direktionalität ist schwieriger zu verstehen: es besagt, dass zwar von einem früheren Element zu einem späteren vorgezogen werden darf, aber nicht umgekehrt von einem späteren Element zu einem früheren. Die moderne Netzwerktheorie, die auf die mathematische Graphtheorie zurückgeht, bezeichnet Uni-direktionalität als *Gerichtetheit*, d.h. eine Verbindung zwischen zwei Elementen A und B ist dann gerichtet, wenn man entweder von A nach B, aber nicht von B nach A gelangen kann, oder umgekehrt. Ein konkretes Beispiel für eine gerichtete Verbindung sind Links auf Webseiten: wenn ich auf meiner Webseite einen Link zu einer anderen Webseite eingerichtet habe, dann kann man durch Anwählen

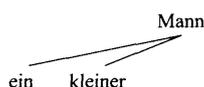
dieses Links zu dieser anderen Webseite gelangen. Man kann aber dann von dieser Webseite nicht über den selben Link zu meiner Webseite zurückgelangen.

Gerichtetheit wird in der Linguistik üblicherweise als *Hierarchie* verstanden, aber die Verwendungsweise ist trotzdem verschieden. Was man insbesondere in Syntaxtheorien unter Hierarchie versteht, ist, dass konstitutive Elemente sprachlicher Äußerungen unabhängig von der reinen Serialisierung hierarchisch miteinander verknüpft sind. Konstituenztheorien drücken das grafisch so aus, dass zwei Elemente A und B einer von ihnen konstituierten Kategorie C hierarchisch untergeordnet sind. Dieses Schema ist rekursiv und endet in einer einzigen Kategorie an der *Spitze* der Struktur. In Dependenztheorien geht man nicht davon aus, dass neue Kategorien konstituiert werden, sondern dass Wörter als konstitutive Elemente direkt von einander abhängen, indem sie zueinander in antisymmetrischen Relationen stehen. Auch hier ergibt sich überlicherweise eine Satzspitze.

Dafür, dass solche gerichteten Strukturen - seien es solche, wie sie Konstituenztheorien vorschlagen, oder solche, wie sie von Dependenztheorien behauptet werden - wirklich in menschlichen Gehirnen verarbeitet werden, gibt es bislang keine eindeutigen und schlüssigen Belege. Vielmehr scheint mir die Vorliebe für Hierarchisierungen, wie sie Linguisten vorschlagen, darin zu gründen, dass das menschliche Gehirn speziell darauf ausgerichtet ist, hierarchische Strukturen in der sozialen Umwelt aufzufassen, zu analysieren, und angemessene Verhaltensmuster auszulösen. Ich halte deswegen die Vermutung, dass linguistisches Handeln von evolvierten kognitiven Mechanismen geleitet ist, für einsichtig, wenn auch spekulativ.

Bezogen auf einen ganz besonderen Problemfall, nämlich den der Strukturierung der deutschen Nominalphrase, zeigt sich, dass kein einziger hierarchischer Vorschlag zur syntaktischen Strukturierung, alle Einwände ausräumen kann. Sprecher und Sprecherinnen des Deutschen verstehen aber *jede* korrekt organisierte deutsche Nominalphrase, weswegen davon ausgegangen werden muss, dass kein einziger Strukturierungsvorschlag emulieren kann, wie dieses Vermögen zustande kommt.

Im einzelnen gibt es vier Vorschläge, wobei es dabei um die Strukturierung einer Äußerung geht, in der ein Artikel, ein attributives Adjektiv und ein Substantiv auftreten. Der traditionelle Ansatz geht davon aus, dass in einer Nominalphrase wie *ein kleiner Mann* sowohl der Artikel als auch das Adjektiv dem Substantiv untergeordnet sind (s. Figur 1).

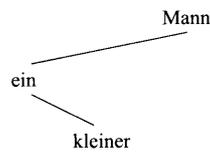


Figur 1: Strukturvorschlag der traditionellen Grammatik

Für diese Analyse spricht, dass lediglich das Substantiv ein Genusmerkmal besitzt und dieses an den Artikel und an das Adjektiv weitergibt. Weiterhin selektieren Substantive Adjektive auch semantisch bezüglich ihrer Verträglichkeit.

Von Ulrich Engel (1977) und Hans-Werner Eroms (1985) wurde innerhalb weniger Jahre die Konkomitanz- bzw. die Doppelkopf-Analyse vorgeschlagen. Ausgehend von der ausgeprägten Klammerstruktur des Deutschen, die sich insbesondere im Hauptsatz zeigt, gehen beide Autoren davon aus, dass diese Klammerstruktur auch in der Nominalphrase besteht, und so besteht bei ihnen zwischen

Artikel verschiedene Adjektivflektionen auslösen (s. Figur 4).



Figur 4: Strukturvorschlag von Groß

Obwohl dieser Vorschlag die formalen Kriterien, nach denen die deutsche Nominalphrase organisiert ist, am angemessensten darstellt, ist eine große Schwäche die, dass das Substantiv nun auf das Adjektiv gar keinen Zugriff mehr hat. Wie oben ausgeführt, selektieren Substantive aber ihre attributiven Adjektive nach semantischer Verträglichkeit. Das Resultat eines solchen Selektionsprozesses kann eine Strukturdarstellung wie Figur 4 aber nicht darstellen.

Keiner der kurz illustrierten Ansätze kann alle wesentlichen Kriterien zur Organisation der deutschen Nominalphrase in seine Strukturdarstellungen mit einbeziehen. In manchen Punkten sind die vier Ansätze teilweise mit einander verträglich, in anderen nicht. Bspw. teilen der traditionelle Ansatz, der Ansatz von Engel und Eröms, und der DP-Ansatz die Annahme, dass das Adjektiv dem Substantiv untergeordnet ist. Dem widerspricht Groß. Der Ansatz von Groß teilt aber mit dem DP-Ansatz die Annahme, dass es überhaupt Determinansphrasen gibt, der Unterschied ist nur, was sie inkorporieren. Weil weitere Vergleiche nichts zur Lösung des Problems beitragen, seien sie hier unterlassen.

1. Grundüberlegungen zu Kasus, Genus und Numerus im Deutschen

Was alle oben genannten Ansätze zur Strukturierung der deutschen Nominalphrase teilen, ist die Annahme, dass die deutsche Nominalphrase - ebenso wie andere syntaktische Strukturen - hierarchisch organisiert ist. Da aber kein Ansatz eine Strukturierung anbieten kann, die allen Einwänden genügt, muss man sich die Frage stellen, ob das menschliche Vermögen, eine deutsche Nominalphrase zu formulieren und zu verstehen, überhaupt auf hierarchisch organisierter Information beruht. Unter dem oben genannten Diktat Tesnières, dass Sprache nur in einer Dimension und nur in einer Richtung organisiert ist, müsste - falls dieses Diktat wahr ist - die deutsche Nominalphrase hierarchielos organisiert sein. In meiner Betrachtung unterstelle ich im folgenden, dass beim Vollzug der kognitiven Aufgabe des Verstehens, also Dekodierens, einer deutschen Nominalphrase bestehend aus Artikel, Adjektiv und Substantiv, Hörer bereits während des Hörens Annahmen über eine mögliche Strukturierung der Nominalphrase machen. Das ist ein großer Unterschied zu den modernen Grammatiken, wo man annimmt, dass zunächst die gesamte syntaktische Struktur abgefahren und danach erst interpretiert wird. In einem solchen Falle müssen keine Annahmen *a priori* gemacht werden, weil die gesamte Information zur Struktur schon vorhanden ist. Wenn aber die Information stückchenweise beim Hörer ankommt, so lässt es sich nicht von vorne herein bestreiten, dass nach jedem Informationspaket schon Interpretationen unternommen werden. Dies lässt sich so formulieren, dass das erste Informationspaket eine Reihe Interpretationsmöglichkeiten eröffnet, die durch das Eintreffen nachfolgender Informationspakete eingeschränkt werden. Nach Eintreffen des letzten Pakets

sollten die Interpretationsmöglichkeiten auf eine einzige eingeschränkt sein. Allerdings gibt es auch Fälle, in denen zwei oder mehr Möglichkeiten übrig bleiben. Solche Fälle sind als *Ambiguitäten* bekannt.

Für jede kognitive Leistung muss eine Zielvorgabe definiert sein. Im Falle der deutschen Nominalphrase lautet diese Zielvorgabe, den Kasus der Nominalphrase festzulegen. Kasus spielt in der syntaktischen Strukturierung eine große Rolle, da über das Zusammenspiel verschiedener Kasus unterschiedliche Valenzrelationen indiziert werden. In der traditionellen Grammatik geht man von einer Kongruenz von Kasus, Numerus und Genus in der deutschen Nominalphrase aus. Unter dieser KNG-Kongruenz versteht man, dass der Artikel, das Adjektiv und das Substantiv jeweils eine Form aufweisen müssen, in der Kasus-, Numerus- und Genusmerkmale denen der anderen, mit auftretenden Wörter entsprechen. Es erhebt sich dahingehend aber der Verdacht, dass Linguisten, die die Annahme einer solchen Kongruenz teilen, die eigentlich aus den Daten hervorgehenden Informationen in die Daten *hinein* interpretieren. Beschränkt man sich zunächst nur auf die Artikel, dann scheint doch offensichtlich zu sein, dass der Artikel *der* verschiedenen Kasus, verschiedenen Numerus und verschiedenes Genus markieren kann. Bspw. kann es sich um den maskulinen Artikel im Nominativ Singular handeln wie in *der Mann*. Es kann sich aber auch um den femininen Artikel im Genitiv Singular oder Dativ Singular handeln wie in *der Frau*. Weiterhin ist auch möglich, dass es sich um den Genitiv Plural handelt wie in *der Männer* oder *der Frauen*. Aus dem Artikel selbst ist jedenfalls ohne weitere Information nicht ersichtlich, welchen Kasus, welchen Numerus und welches Genus er markiert.

Zunächst einmal muss es also darum gehen, die Kategorien der angeblichen Kongruenzrelation genauer zu betrachten. Weil Kasus die aus dem Zusammenspiel zwischen Artikel und Substantiv zu ermittelnde Zielvorgabe ist, soll diese Kategorie zuletzt betrachtet werden. Widmet man sich zuerst den Kategorien Numerus und Genus, so muss man sich die Frage stellen, ob diese beiden - traditionell als getrennt gedachte - Kategorien überhaupt zwei verschiedene Kategorien sind. Während es bei der Kategorie Genus keine Probleme gibt - schließlich gibt es ja wirklich Maskulina, Feminina und Neutra - ist die Kategorie Numerus problematisch. Während es zwar im Lateinischen, von dessen Beschreibung diese strikte Kategorienunterscheidung stammt, bei Maskulina, Feminina und Neutra, die sogar in unterschiedlichen Deklinationen vorkommen, tatsächlich unterschiedliche Singular- und unterschiedliche Pluralformen gibt, ist dies im Gegenwartsdeutschen bei genauerer Betrachtung nicht der Fall. Die Behauptung, *der Männer* sei Genitiv Plural Maskulinum, *der Frauen* aber Genitiv Plural Femininum, lässt sich nur dadurch begründen, dass man die - unstrittige - Behauptung macht, die Singularform von *Männer*, nämlich *Mann*, sei maskulinum, die von *Frauen*, nämlich *Frau*, sei aber femininum. Zwar ist die letztere Behauptung wahr, aber ob sie irgendeine Rolle bei der Beurteilung der beiden Pluralformen spielt, darf bezweifelt werden. Schließlich treten alle Nomina unabhängig von ihrer Singularform mit den selben Artikeln auf. Ein kurzer Blick auf die Pronomina zeigt ebenfalls, dass pluralische Pronomina in der dritten Person alle Feminina sind. Das Deutsche hat also eigentlich gar keine echte Pluralisierung, sondern verwendet als Suppletivform feminine Strukturen. Diese Feminisierung ist allerdings nicht völlig parallel, denn der Dativ Plural beruht auf einer anderen Form als der Dativ Singular von Feminina.

Es gibt also gute Gründe, die beiden Kategorien Genus und Numerus *nicht* zu unterscheiden, sondern

als eine Kategorie zu begreifen: sie beinhaltet Maskulina, Feminina, Neutra und Pluralia. Die Singularformen fallen nun mit den entsprechenden Genus zusammen und damit völlig weg, und Plural wird als Genus behandelt.

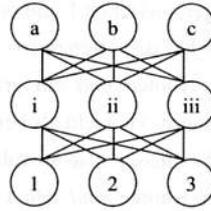
Beim Kasus gibt es ähnliche Probleme: Während es für Maskulina vier klar unterscheidbare Kasusformen gibt, gibt es für Neutra und Pluralia nur drei, denn dort sind Nominativ und Akkusativ gleich. Bei Feminina gibt es gar nur zwei Kasusformen, denn dort sind Nominativ und Akkusativ sowie Genitiv und Dativ gleich. Die Interpretation der femininen Nominalphrase *der Frau* als Genitiv oder Dativ kann ohne weitere Information, die außerhalb dieser Nominalphrase entspringt, nicht eindeutig sein.

2. Neuronale Netzwerke

Der kognitiven Zielvorgabe, aus dem Zusammenspiel von Artikel, Adjektiv und Substantiv den Kasus einer deutschen Nominalphrase zu ermitteln, ist eine weitere Aufgabe voranzustellen: die Bestimmung des Genus der Substantive anhand der Artikelformen.

Dies ist deswegen nötig, weil ich das Zusammenspiel von Artikel, Adjektiv und Substantiv als neuronales Netzwerk beschreiben möchte. Eine - selbst kurze - Geschichte der Entwicklung neuronaler Netzwerke würde den hier gesetzten Rahmen sprengen, so dass ich mich auf eine kurze allgemeine Einleitung beschränke. Das interessierte Publikum sei aber für kurze, übersichtliche Einführungen an Harris & Small (1998), Pinker (1994, 1997) und Satinover (2001) verwiesen. Als Standardwerke der Expertenliteratur sind zu nennen: Rumelhart & McClelland (1986) und Churchland & Sejnowski (1992). Die Funktionsweise und der Aufbau von Neuronen wird übersichtlich von Roth (2001) und Webster (1999) beschrieben. Fundierte Einsichten in die Arbeitsweise der Kognitionswissenschaften geben die Lehrwerke von Gazzaniga et.al. (1998), Nichols et.al. (2001) und Purves et.al. (2001).

Neuronale Netzwerke sind Geflechte einzelner Knoten, die mit einander verbunden sind, und sollen die Prozesse kognitiver Leistungen im Gehirn simulieren. Die Grundidee ist die, dass jeder Knoten mit den verbundenen Knoten in der Form kommuniziert, dass er sie über die vorhandenen Verbindungen aktiviert. Eine Reihe von Knoten wird von außen aktiviert; das stellt die *Eingabe* dar. Die aktivierten Knoten aktivieren ihrerseits die mit ihnen in Verbindung stehen Knoten der nächsten Schicht, in die nicht direkt eingegeben werden kann. Die *Ausgabe* besteht in dem Aktivierungsmuster, das die letzte Knotenschicht liefert. Die Knotenschichten, die nicht direkt an Eingabe und Ausgabe beteiligt sind, nennt man *verborgene* Schichten (s. Figur 5).

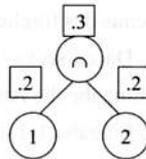
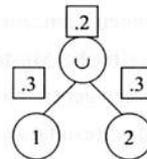


Figur 5: Struktur eines einfachen neuronalen Netzwerks

In Figur 5 mögen die Knoten 1, 2 und 3 Eingabeknoten und a, b und c Ausgabeknoten sein. Die Knoten i, ii und iii sind Knoten einer verborgenen Schicht. In jedem neuronalen Netzwerk gibt es zwei Arten von Elementen: Knoten und Verbindungen. Knoten und Verbindungen sind *gewichtet*, d.h. für jeden Knoten gibt es einen bestimmten *Grenzwert*, der, wenn er erreicht wird, zur Aktivierung führt. Aktivierung heißt, dass dieser Knoten dann alle Verbindungen, die von ihm weg führen, reizt. Verbindungen sind ebenfalls gewichtet, und man nennt das *Aktionspotential*. Das bedeutet, dass eine gereizte und damit aktive Verbindung den Knoten, auf den sie zuführt, mit ihrem Aktionspotential unter bestimmten Bedingungen aktivieren kann. Liegt das Aktionspotential der Verbindung über dem Grenzwert des Knotens, auf den sie zuführt, dann aktiviert sie ihn; liegt das Aktionspotential darunter, dann kann diese Verbindung alleine den Knoten nicht aktivieren.

Die Terminologie von Grenzwert und Aktionspotential ist nicht parallel zur Arbeitsweise tatsächlicher Gehirnzellen. Bei Gehirnzellen sind Verbindungen und Knoten Teile der selben Zelle. *Dendriten* heißen die Verbindungen einer Zelle, die der Zelle Informationen zuführen; *Axon* heißt die Verbindung einer Zelle, die anderen Zellen Information zuführt. Kritisch bei Gehirnzellen ist das Aktionspotential des Axons: am sog. Axonhügel muss es einen bestimmten Wert übersteigen, damit Information durch das Axon zu fließen beginnt. Information innerhalb von Gehirnzellen ist Stromspannung. Die Begriffe Grenzwert und Aktionspotential simulieren Stromspannung. Deswegen ist es auch möglich, dass Grenzwerte und Aktionspotentiale Minuswerte haben. Verbindungen, die als Aktionspotentiale Minuswerte haben, nennt man *inhibitorische* Verbindungen, solche mit Pluswerten *exzitatorische* Verbindungen. Beide Arten von Verbindungen sind für eine Darstellung der deutschen Nominalphrase erforderlich.

Das Zusammenspiel von Gewichten von Knoten und Verbindungen in neuronalen Netzwerken sei an zwei Beispielen illustriert: logisches *und* (s. Figur 6) und inklusives logisches *oder* (s. Figur 7).

Figur 6: Logisches *und*Figur 7: Logisches *oder*

In Figur 6 haben die beiden Verbindungen zwischen 1 und *und*, sowie zwischen 2 und *und* beide das Aktionspotential .2. Der Knoten *und* aber hat den Grenzwert .3. Die Grenzwerte der Knoten 1 und 2 sind hier nicht von Interesse. Weil der Knoten *und* ein größeres Gewicht hat als jede einzelne Verbindung, die zu ihm führt, aber ein kleineres Gewicht als beide Verbindungen zusammen, kann eine Verbindung alleine ihn nicht aktivieren. Es müssen also sowohl Knoten 1 als auch Knoten 2 aktiviert werden, damit beide Verbindungen zum Knoten *und* den Grenzwert dieses Knotens überwinden können.

In Figur 7 haben wieder beide Verbindungen das selbe Aktionspotential, nämlich .3. Der Grenzwert des Knotens *und* ist aber nur .2, weswegen eine Verbindung alleine diesen Knoten überwinden kann. Während in Figur 6 Knoten 1 und Knoten 2 aktiviert sein mussten, gibt es in Figur 7 drei Möglichkeiten: Knoten 1, aber nicht Knoten 2; Knoten 2, aber nicht Knoten 1; Knoten 1 und Knoten 2.

3. Genusbestimmung als neuronales Netzwerk

Die Arbeitsweise, die Struktur und die möglichen Elemente eines neuronalen Netzwerks machen es erforderlich, sich über die Formulierung der Problemstellung Gedanken zu machen. Um die Zielvorgabe der Bestimmung des Kasus zu erreichen, muss ein neuronales Netzwerk zuerst einmal verschiedene Genus unterscheiden können. Das lässt sich bewerkstelligen, wenn man sich vergegenwärtigt, was es für Sprecher und Hörer des Deutschen bedeutet, das Genus eines Substantivs zu kennen. Zu wissen, dass das Substantiv *Mann* maskulinum ist, bedeutet zu wissen, dass es mit den bestimmten Artikeln *der*, *des*, *dem* und *den* auftreten kann. Analoges gilt auch für die anderen Genus einschließlich des Plurals (s. Figur 8).

Genus	Substantive	Artikel
Maskulinum	Mann	der, des, dem, den
Neutrum	Kind	das, des, dem
Femininum	Kinder	die, der, den
Plural	Frau	die, der

Figur 8: Genus als Artikelvorkommnis

Die Anzahl der möglichen Artikel, mit denen ein Substantiv vorkommen kann, korreliert mit dem Grenzwert des Genus, das dieses Substantiv hat. Maskulina haben dem entsprechend den Grenzwert .4, Neutra und Pluralia den Grenzwert .3, und Feminina den Grenzwert .2.

Figur 8 zeigt auch, dass es sechs verschiedene bestimmte Artikel gibt. Da die Anzahl der Artikel, mit denen ein Substantiv vorkommen kann, zur Definition des Genus des fraglichen Substantivs dienen, ist es möglich, als Eingabe spezifische Muster zu verwenden. Da es sechs Artikel gibt, muss es auch mindestens sechs Eingabeknoten geben. Nimmt man für die Eingabe die Anordnung *der-des-dem-den-das-die* an, dann muss sich das Resultat *maskulinum* aus der Eingabe 1-1-1-1-0-0 ergeben, wenn man mit dem Wert 1 die Aktivierung und mit dem Wert 0 die Nichtaktivierung eines Knoten bezeichnet. Figur 9 zeigt die nötigen Eingabemuster. Dort stehen die Resultate in der linken Spalten, in den restlichen Spalten stehen - von links nach rechts gelesen - die erforderlichen Eingabemuster.

Eingabemuster	der	des	dem	den	das	die
maskulinum	1	1	1	1	0	0
neutrum	0	1	1	0	1	0
plural	1	0	0	1	0	1
femininum	1	0	0	0	0	1

Figur 9: Eingabemuster zur Genusbestimmung

Die erforderlichen Ausgabemuster sind selbstverständlich ebenfalls vorher festzulegen: Behält man die Anordnung aus Figur 9 bei, dann ergibt sich für die Genus die Anordnung *maskulinum-neutrum-plural-femininum*. Es gibt also vier mögliche Ausgabeknoten, weil es vier mögliche Genus gibt. Figur 10 zeigt die nötigen Ausgabemuster.

Ausgabemuster	M	N	PL	F
maskulinum	1	0	0	0
neutrum	0	1	0	0
plural	0	0	1	0
femininum	0	0	0	1

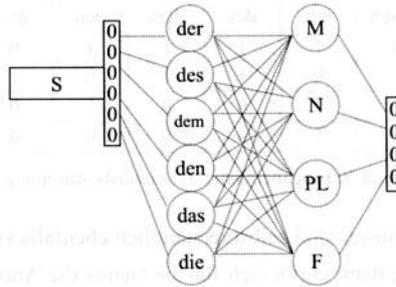
Figur 10: Ausgabemuster zur Genusbestimmung

In Figur 10 bezeichnen die Großbuchstaben die Ausgabeknoten. Soll also ein Substantiv maskulinum sein, so darf in der Ausgabeschicht nur der Knoten M, es dürfen aber nicht zugleich N, PL oder F aktiviert sein. D.h. dass das Eingabemuster 1-1-1-1-0-0 genau das Ausgabemuster 1-0-0-0 ergeben muss. Figur 11 zeigt im Überblick, welche Eingabemuster welche Ausgabemuster erzeugen sollen.

Genus	Eingabemuster	Ausgabemuster
maskulinum	1-1-1-1-0-0	1-0-0-0
neutrum	0-1-1-0-1-0	0-1-0-0
plural	1-0-0-1-0-1	0-0-1-0
femininum	1-0-0-0-0-1	0-0-0-1

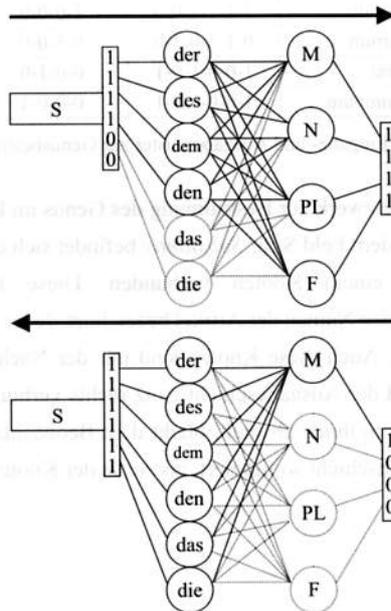
Figur 11: Eingabe- und Ausgabemuster zur Genusbestimmung

Figur 12 zeigt nun, wie ein Netzwerk zur Bestimmung des Genus im Deutschen auf der ersten Stufe aussehen könnte. Rechts neben dem Feld S für *Substantiv* befindet sich die Eingabeschicht. Jedes Feld der Eingabeschicht ist mit einem Knoten verbunden. Diese Knoten sind hier nur der Nachvollziehbarkeit wegen mit den Namen der Artikel bezeichnet. Jeder Artikelknoten ist zunächst mit jedem Genusknoten verbunden. Auch diese Knoten sind nur der Nachvollziehbarkeit betitelt. Jeder Genusknoten ist mit einem Feld der Ausgabeschicht ganz rechts verbunden. Die runden Knoten sind verborgene Schichten. Was sich in ihnen abspielt, bleibt dem Beobachter verborgen. Ob wirklich der oberste Knoten der Artikelknotenschicht so fungiert, als sei es der Knoten für den Artikel *der*, ist nicht direkt einsehbar.



Figur 12: Neuronales Netzwerk

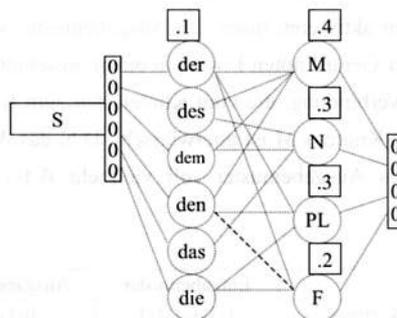
Das erste Problem ist nun, dass alle Artikelknoten mit allen Genusknoten verbunden sind. Gibt man also bspw. das Eingabemuster für Maskulina ein, dann werden zwar alle erforderlichen Artikelknoten aktiviert, leider aber auch alle Genusknoten. Dieses Problem löst man durch ein Verfahren, das man *Rückwärtspropagation* (von engl.: backward propagation, oder kurz: back prop) nennt. Die normale Eingaberichtung heißt daher eigentlich *Vorwärtspropagation*. Bei dem Verfahren der Rückwärtspropagation wird beim ersten Mal in normaler Richtung - in diesem Falle von links - eingegeben. Ergibt sich ein unerwünschtes Ergebnis, dann vertauscht man die Eingaberichtung. Beschränkt man sich zuerst auf Maskulina, dann gibt man links 1-1-1-1-0-0 ein, und wenn in der Ausgangsreihe nicht 1-0-0-0 erscheint, dann gibt man dort wiederum 1-0-0-0 ein. Figur 13 zeigt das Verfahren in sehr vereinfachender Weise. Dort wird folgende Notationskonvention verwendet: aktivierte Knoten und Verbindungen sind durch durchgezogene Linien dargestellt, der Rest durch schwach gepunktete Linien.



Figur 13: Rückwärtspropagation

Im ersten Schritt wird das Muster 1-1-1-1-0-0 eingegeben. Die Knoten *der*, *des*, *dem* und *den* werden aktiviert, und aktivieren weiterhin alle Genusknoten. Weil das nicht das erwünschte Ergebnis erzeugt, wird jetzt rechts das Muster 1-0-0-0 eingegeben. Dadurch werden alle Artikelknoten aktiviert. Nun gibt es aber zwischen beiden Propagationen einen auffallenden Musterunterschied. Bei der Vorwärtspropagation werden die beiden Knoten *das* und *die* niemals aktiviert. Bei der Rückwärtspropagation aber werden die Knoten N, PL und F niemals aktiviert. Wird das in Figur 13 gezeigte Verfahren oft genug wiederholt, dann *lernt* das neuronale Netz, dass die Eingabe 1-1-1-1-0-0 immer die Ausgabe 1-0-0-0 ergibt. Das *Lernen* besteht für ein neuronales Netzwerk darin, die Gewichte der Knoten und Verbindungen den erforderlichen Aktivierungsmustern anzupassen. Oft aktivierte Knoten und Verbindungen setzen ihre Werte herauf, weniger oft oder gar nicht aktivierte Knoten und Verbindungen setzen ihre Werte herab. Für die Verbindungen gilt das aber nur für die exzitatorischen. Das Netzwerk in Figur 12 benötigt aber auch eine inhibitorische Verbindung: Die Eingabe für Pluralia (1-0-0-1-0-1) überlagert die Eingabe für Feminina (1-0-0-0-0-1). Das bedeutet, dass jedes Mal, wenn die Eingabe für Plural erfolgt, eine Ausgabe erscheint, die PL *und* F indiziert. Das liegt daran, dass die Knoten *der* und *die* sowohl zu PL führen als auch zu F. Dies zu vermeiden, lernt das neuronale Netzwerk dadurch, dass die Verbindung zwischen dem Knoten *den* und dem Knoten F zu einer inhibitorischen Verbindung wird. Das Aktionspotential dieser Verbindung muss soweit - und zwar in den Minusbereich - herunter gesetzt werden, dass eine Aktivierung der Knoten *der*, *den* und *die* den Grenzwert von F nicht überschreitet. Inhibitionen sind als gestrichelte Linien notiert.

Die Frage, welche Werte sich inwiefern durch das in Figur 13 gezeigte Verfahren verändern, muss hier leider unbeantwortet bleiben. Der Einfachheit halber sei jetzt angenommen, dass sich nur die Grenzwerte der Knoten verändern und dass sich inhibitorische Verbindungen ausbilden können. Figur 14 zeigt ein geschultes neuronales Netzwerk zur Genusbestimmung im Deutschen.



Figur 14: Geschultes neuronales Netzwerk

In Figur 14 haben der Einfachheit halber alle exzitatorischen Verbindungen den Wert .1, inhibitorische den Wert -.1. Die Artikelknoten haben alle den Wert .1, und die Genusknoten jeweils den über ihnen angezeigten Wert. Der Übersichtlichkeit wegen sind in Figur 4 auch alle Verbindungen nicht mehr notiert, die keine Rolle bei der Berechnung spielen.

4. Substantive mit identischen Singular- und Pluralformen

Mit dem neuronalen Netzwerk in Figur 14 ist es möglich, das Genus jedes Substantivs zu bestimmen, sogar solchen wie den Substantiven *Bäcker* oder *Schraubenzieher*, deren Singular- und Pluralformen identisch sind. Bei solchen Substantiven überlagern sich die Eingabemuster für Maskulina und Pluralia (s. Figuren 9 und 11), sowie die Ausgabemuster (s. Figuren 10 und 11). Die überlagerten Muster sind in Figur 15 dargestellt.

Genus	Eingabemuster	Ausgabemuster
maskulinum & plural	1-1-1-1-0-1	1-0-1-0

Figur 15: Eingabe- und Ausgabemuster für Maskulina mit identischen Singular- und Pluralformen

Allerdings gibt es auch Neutra, der Singular- und Pluralformen identisch sind. Beispiele sind Substantive wie *Waschbecken* oder *Geländer*. Hier ergibt sich nun das Problem, dass die Eingabemuster für neutrale Substantive und für Pluralia konvers sind. Figur 16 wiederholt die Ein- und Ausgabemuster für Neutra und Pluralia.

Genus	Eingabemuster	Ausgabemuster
neutrum	0-1-1-0-1-0	0-1-0-0
plural	1-0-0-1-0-1	0-0-1-0

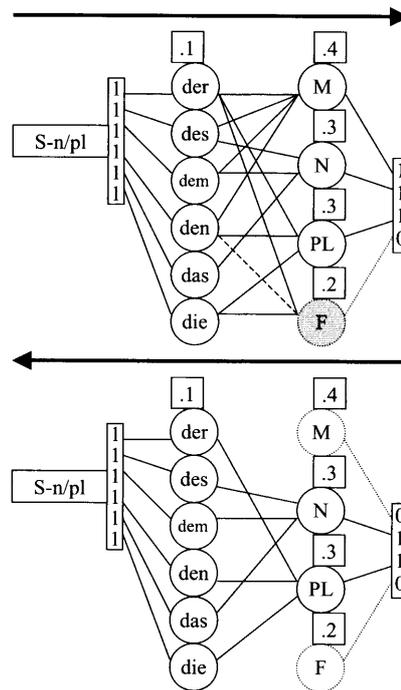
Figur 16: Eingabe- und Ausgabemuster für Neutra und Pluralia

Figur 16 zeigt deutlich, dass ein Eingabemuster für Neutra mit identischen Singular- und Pluralformen *alle* Artikelknoten aktivieren muss. Im Ausgabemuster sollen aber trotzdem nicht alle Genusknoten aktiviert sein. Der Genusknoten F wird in einem geschulten neuronalen Netzwerk zwar nicht mehr aktiviert, weil die Verbindung, die vom Knoten *den* zum Knoten F verläuft, inhibitorisch wirkt, aber die Aktivierung des Knotens M ist unerwünscht. D.h. das Ausgabemuster 1-1-1-0 soll als nicht korrekt gelten. Korrektes Ausgabemuster soll vielmehr 0-1-1-0 sein. Figur 17 gibt diese Anforderungen wieder.

Genus	Eingabemuster	Ausgabemuster
neutrum & plural	1-1-1-1-1-1	0-1-1-0

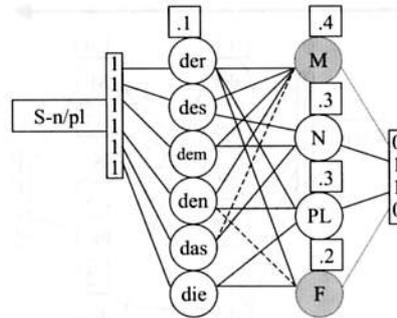
Figur 17: Eingabe- und Ausgabemuster für Neutra mit identischen Singular- und Pluralformen

Damit das erwünschte Ausgabemuster erzeugt werden kann, muss wieder das Verfahren der Rückwärtspropagation angewendet werden. Figur 18 zeigt das Verfahren; dort sind inhibierte Knoten grau dargestellt.



Figur 18: Rückwärtspropagation für Neutra mit identischen Singular- und Pluralformen

In Figur 18 ist folgende Musterdifferenz zu beobachten: Bei der Vorwärtspropagation werden alle Knoten bis auf den Genusknoten F aktiviert. Das Ausgabemuster ist demnach 1-1-1-0, das aber nicht erwünscht ist. Bei der in Figur 18 unten dargestellten Rückwärtspropagation wird nun das erwünschte Ausgabemuster als Eingabemuster rechts eingegeben. Dabei zeigt sich, dass links das korrekte Eingabemuster als Ausgabemuster erzeugt werden kann, ohne dass die Genusknoten M und F aktiviert werden. Bei der erneuten Vorwärtspropagation - das Verfahren muss ja viele Male durchgeführt werden - muss also die Aktivierung des Genusknotens M irgendwie verhindert werden. Wie das geschehen kann, kann man sich am besten verdeutlichen, wenn man sich klar macht, dass in Figur 18 nur die bisher relevanten Verbindungen dargestellt sind. Eigentlich ist aber immer noch jeder Artikelknoten mit jedem Genusknoten verbunden. Das bedeutet, dass die zur Erzeugung korrekter Ausgabemuster irrelevanten Verbindungen zwar immer noch vorhanden sind, aber so schwache Aktionspotentiale haben, dass sie keinen berechenbaren Einfluss auf das Zustandekommen korrekter Ausgabemuster haben. Eine Verbindung, die zum Knoten M verläuft und die die Aktivierung dieses Knotens verbinden könnte, muss eine Verbindung sein, die niemals an der Erzeugung korrekter Ausgabemuster für die Knoten M und PL beteiligt ist. Der einzige Knoten, der diese Eigenschaften hat, ist der Artikelknoten *das*. Weil dieser, wenn auch derzeit nur schwach, immer noch mit dem Genusknoten M verbunden ist, kann er bei häufiger Anwendung der Rückwärtspropagation zu einer inhibitorischen Verbindung werden. Figur 19 zeigt, wie ein durch das in Figur 18 dargestellte Verfahren geschultes neuronales Netzwerk dann aussieht.



Figur 19: Geschultes neuronales Netzwerk für Neutra mit identischen Singular- und Pluralformen

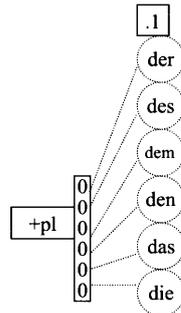
In Figur 19 kann man sehen, wie der Genusknoten M durch die Aktivierung der Verbindung vom Artikelknoten *das* inhibiert wird.

5. Erweiterung des neuronalen Netzwerks: Pluralmorpheme

Allerdings lassen sich mit dem neuronalen Netzwerk in Figur 19 nicht die Pluralformen von Substantiven bearbeiten, deren Pluralform durch Pluralmorpheme gebildet werden müssen. Pluralformen wiederum, die ohne Anschläge, aber durch Ablaut gebildet werden, kann das neuronale Netzwerk auch in dem bisherigen Zustand schon bearbeiten. Im Gegenwartsdeutschen gibt es vier Pluralmorpheme: *-e*, *-En*, *-er* und *-s*. Bei *-e* und *-er* können Ablaute auftreten. Das Pluralmorphem *-En* hat zwei Allomorphe: *-n* wie bei *Dame.n* und *-en* wie bei *Frau.en*. Zwar wäre es durchaus möglich, auf eine separate Behandlung der Pluralmorpheme ganz zu verzichten, und pluralisierte Substantive *en bloc* mit dem bisherigen neuronalen Netzwerk zu bearbeiten, aber das wäre aus zwei Gründen nicht völlig legitim: Erstens handelt es sich bei den Pluralmorphemen um vom Substantiv separate Informationspakete, die also auch separat abgearbeitet werden sollten, und zweitens erfordern kasuelle Anschläge wie das Genitivsuffix *-s* bei Maskulina und Neutra, das Kasussuffix *-En* wie bei *Student.en* oder *Name.n.s*, sowie das Kasussuffix für den Dativ Plural *-n* eine gesonderte Behandlung. Beide Gründe machen ein separates Modul für die Pluralmorpheme erforderlich. Anstatt aber für jedes mögliche Pluralmorphem oder gar jedes mögliche Allomorph ein eigenes Eingabefeld anzunehmen, soll hier nur ein einziges Eingabefeld für alle Pluralmorpheme angenommen werden.

Wie das neue Pluralmodul mit dem bisherigen Netzwerk verknüpft werden soll, bedarf einiger Überlegungen: Üblicherweise gibt man an allen benötigten Eingabeknoten gleichzeitig ein, indem man diese Eingabeknoten aktiviert. Wie oben geschildert, ist Sprache aber ein streng sequenzialisiertes Phänomen, wo es eine große Rolle spielt, ob ein bestimmtes Informationspaket früher oder später als ein anderes Informationspaket serialisiert wird. Das Deutsche ist morphologisch so organisiert, dass ohne Ausnahme Pluralmorpheme nach den Substantiven erscheinen, die sie pluralisieren. Es handelt sich hierbei ausschließlich um *Suffixe*. Das bedeutet, dass das Informationspaket Plural *nach* dem substantivischen Informationspaket auftritt. Daraus folgt, dass in allen Fällen, in denen Plural ein separates und später auftretendes Informationspaket ist, das neuronale Netzwerk zur Genusbestimmung

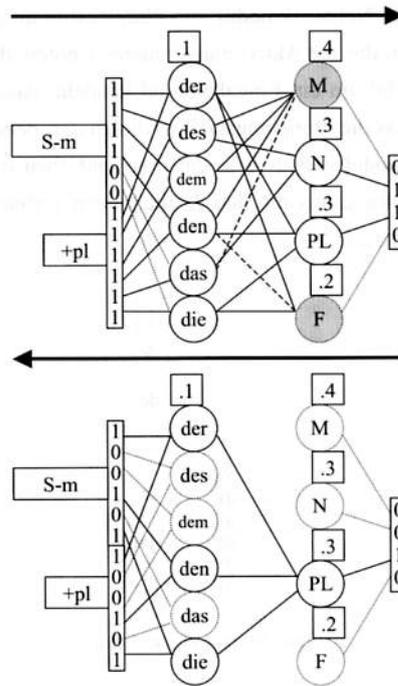
schon aktiviert worden ist. Das Netzwerkmodul zur Pluralbestimmung muss deswegen alle schon vorgenommenen Aktivierungen, die zur Aktivierung anderer Knoten als PL führen, deaktivieren. Es muss sich also beim Pluralmodul um ein Eingabemodul handeln, das inhibitorische Verbindungen ausbildet. Das heißt genauer, dass die Pluraleingabe die Knoten *des*, *dem* und *das* inhibieren muss. Die Eingabeschicht für das Pluralmodul enthält dem entsprechend ebenso wie das bisherige neuronale Netzwerk sechs Eingabefelder, die direkt mit den Artikelknoten verbunden sind. Die linke Seite des Pluralmoduls wird in Figur 20 gezeigt.



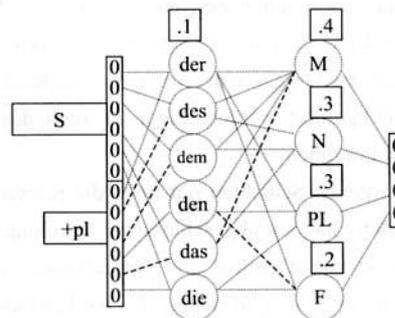
Figur 20: Das Pluralmodul

Für das Pluralmodul gilt das selbe wie für das bisherige Netzwerk: Durch Rückwärtspropagation muss es zunächst lernen, dass auf die Eingabe 1-1-1-1-1-1 die Ausgabe 0-0-1-0 erfolgen muss. Allerdings wird das Pluralmodul an ein schon geschultes neuronales Netzwerk angeschlossen. Das bedeutet, dass sich bestimmte Gewichte durch den Lernprozess der Vorwärts- und Rückwärtspropagation schon festgesetzt haben. Hier muss das Verfahren der Vorwärts- und Rückwärtspropagation aber für alle bisher bestimmbar Genus durchgeführt werden. Figur 21 zeigt das Lernverfahren anhand eines maskulinen Substantivs mit Pluralmorphem.

In Figur 21 sind in den verborgenen Schichten nur noch die relevanten Verbindungen angezeigt. Gleich welches Genus ein Substantiv hat, vor abgeschlossener Schulung wird das erweiterte neuronale Netzwerk bei Vorwärtspropagation zuerst einmal alle Artikelknoten aktivieren. Die Folge ist eine Aktivierung der Genusknoten N und PL, aber nicht M und F, weil zwischen den Artikelknoten *das* und dem Genusknoten M und dem Artikelknoten *den* und dem Genusknoten F schon inhibitorische Verbindungen bestehen. Bei Rückwärtspropagation allerdings werden nur noch der Genusknoten PL und die Artikelknoten *der*, *den* und *die* aktiviert. Das erweiterte neuronale Netzwerk ist nun wieder in der Situation, aus dem Querschnitt der Anzahl der aktivierten Knoten bei den jeweiligen Propagationen zu ermitteln, welche Knoten bei Vorwärtspropagation immer aktiviert sein müssen, und welche nicht aktiviert werden dürfen. Das neuronale Netzwerk muss deswegen lernen, dass die Verbindungen vom Eingabefeld des Pluralmoduls die Aktionspotentiale der Verbindungen zu den Artikelknoten *des*, *dem* und *das* soweit in den Minusbereich zu verlagern sind, dass inhibitorische Verbindungen entstehen. Figur 22 zeigt dann ein geschultes erweitertes neuronales Netzwerk.



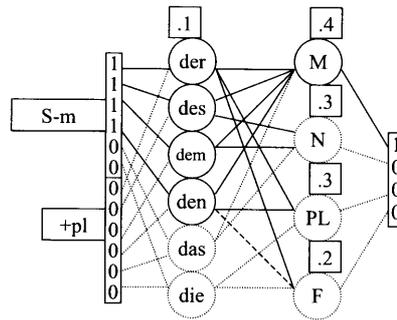
Figur 21: Rückwärtspropagation mit angeschlossenem Pluralmodul



Figur 22: Geschultes erweitertes neuronales Netzwerk

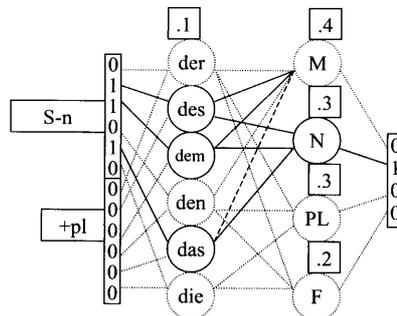
6. Prüfung des erweiterten neuronalen Netzwerks

An dieser Stelle ist es angebracht, die Arbeitsweise des erweiterten Netzwerks einmal zu prüfen. Die Figuren 23 bis 26 zeigen die Arbeitsweise für Maskulina, Neutra, Pluralia und Feminina im Singular, die Figuren 27 und 28 zeigen Maskulina und Neutra mit identischen Singular- und Pluralformen, und die Figuren 29 bis 31 die möglichen Pluralisierungen durch Pluralmorpheme.



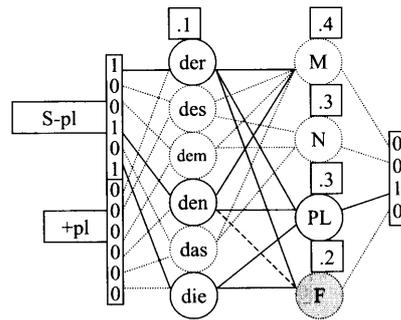
Figur 23: Maskulina im Singular

Figur 23 zeigt die Abarbeitung eines maskulinen Substantivs wie *Mann*. Das Eingabemuster im Substantivfeld aktiviert die Artikelknoten *der*, *des*, *dem* und *den*. Da aktivierte Knoten alle Verbindungen aktivieren, die von ihnen wegführen, aktiviert der Knoten *der* die Verbindungen zu den Genusknoten M, PL und F. Die Knoten *des* und *dem* aktivieren die jeweiligen Verbindungen zu den Genusknoten M und N. Der Knoten *den* aktiviert die Verbindungen zu den Genusknoten M, PL und F, wobei die Verbindung zu F inhibitorisch wirkt. Die Genusknoten N, PL und F erhalten zu wenig Eingänge aktivierter Verbindungen, so dass deren Grenzwerte nicht überschritten werden. Folglich bleiben sie deaktiviert. Der Knoten M aber erhält Eingänge von vier Verbindungen, so dass der Grenzwert .4 erreicht und M aktiviert wird. Das Ausgabemuster ist korrekt.



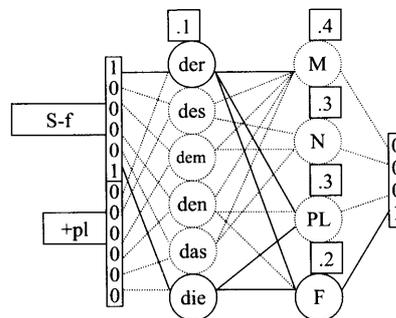
Figur 24: Neutra im Singular

Figur 24 zeigt die Abarbeitung eines neutralen Substantivs im Singular wie *Kind*. Das Eingabemuster aktiviert die Artikelknoten *des*, *dem* und *das*. Diese Knoten aktivieren ihre jeweiligen Verbindungen, die aber nur zu den Genusknoten M und N führen. Der Knoten M erhält zu wenig Eingänge von Verbindungen, so dass er deaktiviert bleibt. Außerdem würde die Summe der Aktionspotentiale der Verbindungen, die auf M zulaufen, durch die inhibitorische Verbindung vom Knoten *das* herabgesetzt. Der Knoten N aber erhält genau drei Eingänge von Verbindungen, so dass sein Grenzwert erreicht und er aktiviert wird. Das Ausgabemuster ist korrekt.



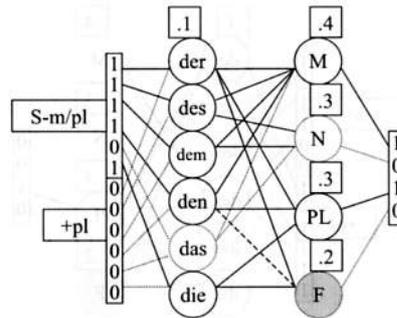
Figur 25: Pluralia

Figur 25 zeigt die Abarbeitung eines pluralischen Substantivs wie *Väter* oder *Bäcker*. Das Eingabemuster aktiviert die Artikelknoten *der*, *den* und *die*. Diese aktivieren ihre jeweiligen Verbindungen zu den Genusknoten M, PL und F. Der Grenzwert von M wird bei nur zwei Eingängen nicht erreicht. Der Knoten PL erhält genau drei Eingänge und wird daher aktiviert. Der Knoten F erhält ebenfalls drei Eingänge, aber davon sind zwei exzitatorisch - die Verbindungen *der*-F und *die*-F - und eine inhibitorisch - die Verbindung *den*-F. Der Grenzwert von F ist $.2$, und eigentlich müssten die zwei exzitatorischen Eingänge diesen Wert erreichen. Aber die inhibitorische Verbindung hat ein negatives Aktionspotential, und wenn dieser Wert zu der Summe der Aktionspotentiale der beiden exzitatorischen Verbindungen addiert wird, dann ergibt sich ein Wert, der unter $.2$ liegt. Deswegen wird der Knoten F nicht aktiviert. Das Ausgabemuster ist demnach korrekt.



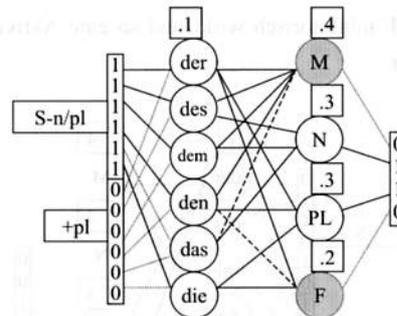
Figur 26: Feminina im Singular

Figur 26 zeigt die Abarbeitung eines femininen Substantivs im Singular wie *Frau*. Das Eingabemuster aktiviert die Artikelknoten *der* und *die*. Diese aktivieren ihre jeweiligen Verbindungen zu den Genusknoten M, PL und F. Die Knoten M und PL erhalten aber zu wenig Eingänge, so dass sie nicht aktiviert werden können. Der Knoten F erhält genau zwei Eingänge, und weil jetzt der Artikelknoten *den* nicht aktiviert ist, ist die inhibitorische Verbindung zwischen *den* und F nicht aktiviert und kann daher nicht negativ auf die Summe der Aktionspotentiale einwirken. Der Grenzwert von F ist also hier erreicht, weshalb der Knoten aktiviert wird. Das Ausgabemuster ist korrekt.



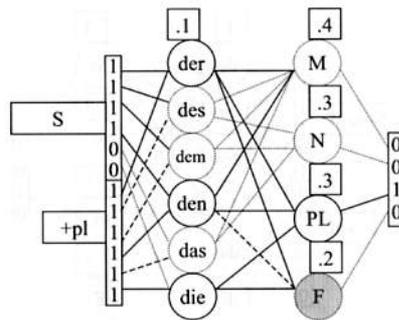
Figur 27: Maskulina mit identischen Singular- und Pluralformen

Figur 27 zeigt die Abarbeitung eines maskulinen Substantivs, dessen Singular- und Pluralform identisch sind, wie *Teller*. Das Eingabemuster im Substantivfeld aktiviert alle Artikelknoten bis auf *das*. Das führt dazu, dass die Genusknoten M und PL gleichzeitig aktiviert sind. Der Genusknoten F wird wieder durch die inhibitorische Verbindung, die vom Knoten *den* ausgeht, an der Erreichung des Grenzwerts gehindert und bleibt somit deaktiviert. Das Ausgabemuster ist korrekt.



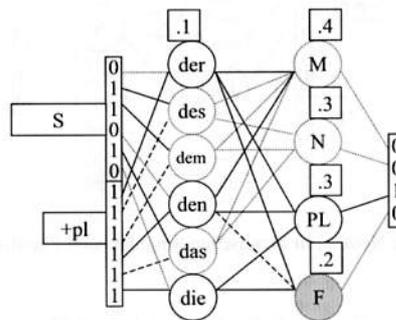
Figur 28: Neutra mit identischen Singular- und Pluralformen

Figur 28 zeigt die Abarbeitung eines neutralen Substantivs mit identischer Singular- und Pluralform wie *Zimmer* oder *Becken*. Das Eingabemuster aktiviert alle Artikelknoten. Die Genusknoten M und F werden durch die inhibitorischen Verbindungen, die vom Knoten *das* zu M und vom Knoten *den* zu F laufen, an der Erreichung des Grenzwerts gehindert. Aktivierte Genusknoten sind demnach nur N und PL. Das Ausgabemuster ist daher korrekt.



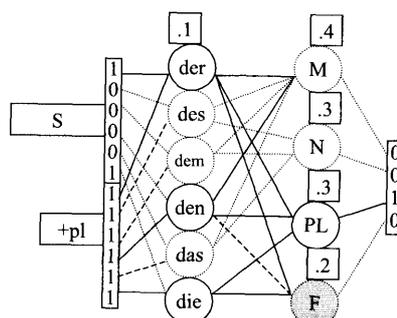
Figur 29: Maskulina mit Pluralmorphemen

Figur 29 zeigt die Abarbeitung eines maskulinen Substantivs mit einem Pluralmorphem wie *Tische*, *Namen* oder *Männer*. Das Eingabemuster im Substantivfeld aktiviert die Verbindungen zu den Artikelknoten *der*, *des*, *dem* und *den*. Das Eingabemuster im Pluralfeld aber aktiviert alle Verbindungen, von denen zwei, nämlich die Verbindungen zum Knoten *des* und zu dem Knoten *dem*, inhibitorisch wirken, weswegen diese beiden Knoten nicht aktiviert werden können. Die aktivierten Artikelknoten *der*, *den* und *die* lösen nun die Aktivierung des Genusknoten PL aus, wobei der Knoten *den* durch die Verbindung zum Genusknoten F inhibitorisch wirkt und so eine Aktivierung von F verhindert. Das Ausgabemuster ist daher korrekt.



Figur 30: Neutra mit Pluralmorphemen

Figur 30 zeigt die Abarbeitung eines neutralen Substantivs mit einem Pluralmorphem wie bspw. *Telefone* oder *Kinder*. Hier können trotz der korrekten Eingabe im Substantivfeld die Artikelknoten *des*, *dem* und *das* nicht aktiviert werden, weil inhibitorische Verbindungen, die aus dem Pluralfeld aktiviert werden, das Erreichen des Grenzwertes der betreffenden Artikelknoten verhindern. Das Ausgabemuster ist korrekt.



Figur 31: Feminina mit Pluralmorphemen

Figur 31 zeigt die Abarbeitung eines femininen Substantivs mit einem Pluralmorphem wie *Frauen* oder *Lampen*. Das Eingabemuster im Substantivfeld erzeugt weniger Aktivierungen als das im Pluralfeld, und die die es erzeugt, überlagern sich. Das Ausgabemuster ist demnach korrekt.

7. Zusammenfassung

In den voran gegangenen, recht technisch formulierten Abschnitten war angestrebt worden zu zeigen, dass die kognitive Verarbeitung deutscher Genus sich übersichtlich, nachvollziehbar und einsichtig als komplexes neuronales Netz repräsentieren lässt. Denn irgendwie müssen ja die Unterscheidungen betreffs deutscher Genus, die deutsche Sprecher und Sprecherinnen fällen, in entsprechenden Gehirnstrukturen repräsentiert sein. Eine solche auf der Theorie neuronaler Netze aufbauenden Repräsentation muss zwar alle Register der Theorie ziehen, um die Phänomene beschreiben und modellieren zu können, aber sie kommt mit den zentralen Begriffen der neuronalen Netzwerktheorie und den entsprechenden Zweigen der Kognitionsforschung aus. Deutsches Genus wird dem zu Folge aller Wahrscheinlichkeit als neuronales Netzwerk im Gehirn verankert.

Literatur :

- Bhatt, Christa (1990): Die syntaktische Struktur der Nominalphrase im Deutschen. Tübingen: Gunter Narr Verlag.
- Churchland, Patricia & Sejnowski, Terrence (1992): The Computational Brain. Cambridge, Massachusetts.
- Engel, Ulrich (1977): Syntax der deutschen Gegenwartssprache. 1982². Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Eroms, Hans-Werner (1985): Eine reine Dependenzgrammatik für das Deutsche. In: Zeitschrift für Deutsche Sprache 13. p. 306–326.
- Gazzaniga, Michael et.al. (1998): Cognitive Neuroscience. New York & London.
- Groß, Thomas (1993): NP vs DP. In: Papiere zur Linguistik. Nr.48. p. 3–28.
- Harris, Anthony E. & Computational Models of Normal and Impaired Language in
- Small, Steven L. (1998): The Brain. In: Handbook of Neurolinguistics. Hrsg. Brigitte Stemmer, Harry A. Whitaker. San Diego et.al.: Academic Press. p. 343–355.
- Nichols, John et.al. (2001): From Neuron to Brain. 4th edition. Sunderland, Massachusetts.
- Olsen, Susan (1991a): Die deutsche Nominalphrase als Determinansphrase. In: »DET, COMP und INFL«. Hrsg. Susan Olsen, Gisbert Fanselow. Tübingen: Max Niemeyer Verlag. p.35-56.
- (1991b): AGR(eement) und Flexion in der deutschen Nominalphrase. In: Strukturen und Merkmale syntaktischer Kategorien. Hrsg. Gisbert Fanselow, Sascha Felix. Tübingen: Gunter Narr Verlag. p. 50–69.
- Pinker, Steven (1994): The Language Instinct. London: Penguin.

- Pinker, Steven (1997): *How the Mind Works*. London: Penguin
- Purves, Dale et.al. (2001): *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland, Massachusetts.
- Roth, Gerhard (2001): *Fühlen, Denken, Handeln: Wie das Gehirn unser Verhalten steuert*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Rumelhart, David & McClelland, James (1986): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 2. Cambridge, Massachusetts.
- Satinover, Jeffrey (2001): *The Quantum Brain*. New York: John Wiley & Sons.
- Tesnière, Lucien (1959): *Éléments de syntaxe structurale*. Paris: Librairie C. Klincksieck. Hier zitiert nach der deutschen Ausgabe: *Grundzüge der strukturalen Syntax*. Stuttgart: Klett-Cotta, 1980. Hrsg. u. Übers. Ulrich Engel.
- Webster, Douglas B. (1999): *Neuroscience of Communication*. Second Edition. San Diego et.al.: Singular Publishing Group Inc.
- Satinover, Jeffrey (2001): *The Quantum Brain*. New York.